

Ф.И. Яковлев, д-р. техн. наук, В.П. Маршуба, канд. техн. наук
Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТОТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Установлена научнообоснованная зависимость изменения магнитных свойств магнитотвердых сплавов на основе системы Fe-Al-Ni от температуры закалки и способов нагрева до заданных температур. На основе полученных зависимостей возможно получение более высоких магнитных свойств у данных сплавов, что способствует снижению себестоимости их производства.

Введение. Магнитотвердые материалы широко используются для изготовления постоянных магнитов и нашли широкое применение в различных областях народного хозяйства. Поэтому номенклатура изделий, в которых применяются магнитотвердые материалы, чрезвычайно широкая.

Функциональное назначение этих устройств и условия, в которых они работают, определяют высокие требования к магнитным свойствам магнитотвердых материалов.

Анализ последних исследований и публикаций. В наибольшей степени этим требованиям отвечают сплавы на основе Fe-Ni-Al. Их состав, условия производства и свойства регламентируются требованиями существующих стандартов. Для обеспечения постоянства магнитных свойств, предусмотренных этими стандартами, сплавы подвергаются термической обработке, которая осуществляется в магнитном поле достаточно высокой напряженности. При этом необходимо отметить, что сплавы Fe-Ni-Al получают методом литья. Но, как известно, в отливках не исключено возникновение пористости, незначительного количества неметаллических включений и других литейных дефектов¹. На этом основании можно отметить, что режимы термической обработки, предусмотренные стандартом, не позволяют постоянно получать требуемые магнитные свойства сплавов. Данный фактор послужил основой для проведения исследований.

Цель исследований – установить влияние режимов закалки и условий нагрева образцов-колец из магнитотвердых сплавов на основе Fe-Ni-Al до температуры закалки. На основе найденных закономерностей термической обработки магнитотвердых материалов разработать научнообоснованные рекомендации применительно к производству деталей из этих сплавов.

Изложение основного материала. Влияние режимов закалки и условий нагрева до температуры закалки исследовали на стандартных магнитотвердых сплавах марок ЮНДК35Т5БАА и ЮНДК35Т5 на образцах-кольцах, изготов-

1. *Металлография железа*. В 3-х т. Пер. с англ. – М.: Металлургия. 1972, - Т.1 - 246 с.

ленных по стандартной технологии. Для определения параметров магнитных свойств материалов использовали стандартную методику.

Известно, что магнитные свойства магнитотвердых сплавов определяются однородностью их кристаллической структуры, а стабильность - этих свойств устойчивостью кристаллической структуры в условиях колебания температуры, которые неизбежны в условиях эксплуатации. Кроме температурного фактора, магнитные свойства сплавов могут изменяться от воздействия вибрации и ударной нагрузки на магниты, которую принято называть магнитным старением. Но если влияние магнитного старения легко устраняются путем повторного намагничивания, то влияние структурных изменений в условиях эксплуатации невозможно устранить. Поэтому очень важно получить равновесную структуру сплава в процессе термической обработки. Следует подчеркнуть, что получение равновесной структуры сплава зависит как от режима термической обработки, так и химического состава.

Известно, что стандарты допускают предел изменения количественного содержания каждого химического элемента, входящего в состав исследуемых сплавов. На этом основании были выбраны следующие температуры нагрева под закалку: 1060, 1080, 1100° С. И так как условия нагрева определяются его скоростью закалки, а следовательно, и длительностью пребывания образцов-колец в интервале фазовых превращений, то образцы-кольца загружали в печь, нагретую до температур 1060, 1080°С и 1100° С. По каждому из режимов обрабатывали по 5 образцов.

Известно, что однородность исходной структуры сплава определяется не только содержанием химических элементов в его составе, но и их геометрическим фактором. Как правило, в условиях производства изделий из магнитотвердых сплавов геометрический фактор не учитывается. В химический состав исследуемых сплавов входят элементы, образующие твердые растворы замещения. Атомные диаметры железа в α - и γ - модификациях равны соответственно 2,48 и 2,52 кХ, т.е. в среднем 2,5 кХ. Интервал геометрического подобию (геометрический фактор равен 15%) составляет 0,38 кХ, и, следовательно, атомные диаметры химических элементов, способных образовывать с железом твердые растворы должен составлять от 2,1 до 2,9 кХ. Так, атомный диаметр алюминия равен 2,8; никеля - 2,49; меди - 2,5; кобальта - 2,5; титана – 2,93 и ниобия – 2,92 кХ. Приведенные данные атомных диаметров показывают, что алюминий, никель, медь, кобальт образуют непрерывный ряд в твердых растворах замещения. Атомные диаметры титана и ниобия больше допустимого предела образования твердых растворов замещения, т.е. они приближаются к границе области благоприятного геометрического фактора. Поэтому на диаграмме состояния железо-титан и железо-ниобий проявляется ограниченная область растворимости данных элементов при нагреве до 1100° С. Вследствие этого структура исследуемых сплавов в литом состоянии состоит из β - фазы и незначительных интерметаллических включений состава Fe_2Ti и FeTi , а в сплаве с ниобием имеют место небольшие эндогенные включения. В силу того, что

такие включения немагнитные, и чем больше их количество, тем меньше магнитные свойства литых сплавов.

При выбранных температурах закалки высокотемпературная β - фаза превращается в низкотемпературные фазы - β_1 и β_2 . При этом β_1 -фаза ферромагнитная, тогда как β_2 -фаза – слабо ферромагнитная. Поэтому очень важно в процессе закалки и последующего отпуска получить однородную β_1 -фазу, имеющую пластинчатую форму кристаллов.

С температуры закалки образцы-кольца охлаждались по ступенчатому режиму, а именно от температур - 1060, 1080 и 1100 до 900° С со скоростью 200° С/мин, а в интервале от 900 до 600° С – со скоростью 25° С/мин. Охлаждение осуществлялось в магнитном поле напряженностью 160 кА. По достижении температурного порога 600° С образцы-кольца загружались в печь, нагретую до 610° С на отпуск, длительность которого 5 часов.

Полученные результаты исследований магнитных свойств образцов-колец сведены в таблицу.

Магнитные свойства сплавов марок ЮНДК35Т5БАА и ЮНДК35Т5, полученные в результате проведенных исследований

Марки сплавов	Режим термообработки образцов	Т° С, закалки образцов	(ВН)max, кДж/м ³	Нс, кА/м	Br, Тл	Форма кристаллов
ЮНДК35Т5БАА	1	1060	70	100	0,90	монокристаллическая
	2	1080	76	104	0,96	
	3	1100	78	109	1,00	
	4	1080	80	115	1,08	
ЮНДК35Т5	1	1060	28	98	0,61	Равновесная
	2	1080	32	101	0,65	
	3	1100	35	106	0,71	
	4	1080	39	110	0,75	

Из анализа результатов магнитных свойств, приведенных в таблице, следует, что значение (ВН)max после термической обработки по режиму №1 в среднем равно 70 кДж/м³, Нс = 100 кА/м, а Br = 0,90 Тл. Относительно невысокие магнитные свойства, полученные после обработки образцов-колец по режиму №1, видимо, связаны с неполным завершением превращения β -фазы в β_1 и β_2 – фазы и высокой дисперсностью структуры закалки.

Свойства образцов-колец, обработанных по режиму №2, несколько выше по сравнению с магнитными свойствами образцов обработанных по режиму №1. Так, значение $(BH)_{\max}$ повышается на 6 кДж/м³, коэрцитивная сила – на 4 кА/м, а остаточная индукция - на 0,06 Тл. Закалка с температурного предела 1100° С обеспечивает дальнейшее повышение магнитных свойств сплава.

На основании приведенных данных по магнитным свойствам следует отметить, что эти свойства определяются температурой закалки и скоростью нагрева образцов-колец до заданной температуры. И хотя разность скорости нагрева образцов-колец между рассмотренными режимами относительно небольшая, но даже при этом значении разности скоростей нагрева мало изменяется дисперсность микроструктуры сплава даже при нагреве до 1100° С.

Наибольшие магнитные свойства сплава получены после термической обработки по режиму №4, что обусловлено полнотой завершения процесса превращений β фазы в β_1 и β_2 -фазы, а также ростом кристаллов образовавшихся фаз. На основании полученных данных по магнитным свойствам образцов-колец можно сделать заключение о том, что термическая обработка №4 является оптимальной для сплава ЮНДК35Т5БАА.

После снятия внешнего магнитного поля магнитные свойства сплавов характеризуются формой кривых размагничивания, которые для сплава ЮНДК35Т5БАА показаны на рис. 1.

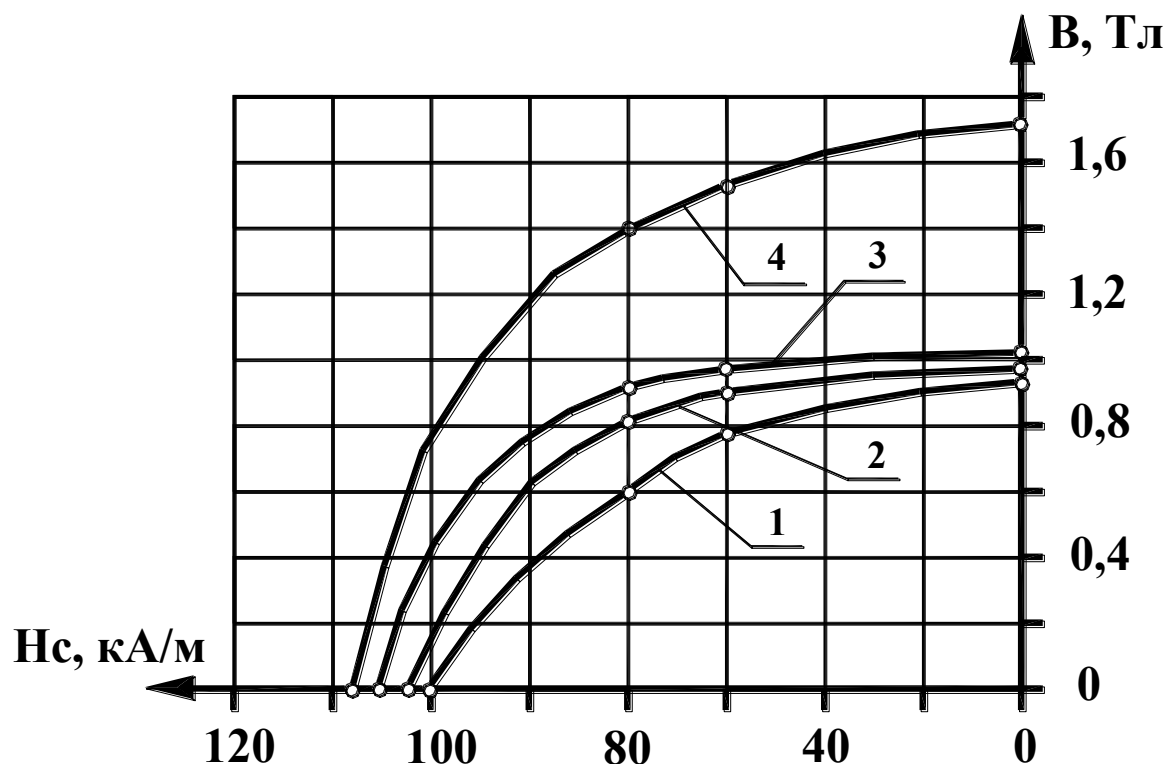


Рис. 1. Кривые размагничивания сплава ЮНДК35Т5БАА: 1 – закалка по режиму № 1; 2 – закалка по режиму № 2; 3 – закалка по режиму № 3; 4 – закалка по режиму № 4

Анализ кривых, приведенных на рис. 1, показывает, что значение размагничивания определяется режимом термической обработки сплава. Так, обработка образцов-колец по режиму №1 позволяет получить минимальное значение магнитных свойств, а по режиму №4 – максимальное.

Из таблицы следует, что сплав ЮНДК35Т5 при неизменных режимах термической обработки напряженности внешнего магнитного поля имеет меньшие значения магнитных свойств по сравнению со сплавом ЮНДК35Т5БАА. Это можно объяснить тем, что ниобий так же, как и алюминий, кобальт и титан, улучшают магнитные свойства. Кроме этого, на магнитные свойства оказывает влияние форма кристаллов β_1 фазы. Сплав ЮНДК35Т5 имеет равновесную структуру кристаллов, а сплав ЮНДК35Т5БАА - монокристаллическую. Поэтому сплав ЮНДК35Т5БАА по сравнению с другими сплавами имеет более высокие магнитные свойства, что позволяет снизить массу и габариты магнитных систем.

Термическая обработка образцов-колец по режиму №1 дает возможность получить следующие значения магнитных свойств: $(BH)_{\max} = 28 \text{ кДж/м}^3$; $H_C = 98 \text{ кА/м}$; $B_r = 0,61 \text{ Тл}$. Относительно низкие магнитные свойства сплава ЮНДК35Т5 можно объяснить отсутствием полного завершения процесса превращения β фазы в β_1 и β_2 фазы, а следовательно и отсутствием равновесного состояния структуры сплава.

Режим термической обработки №2 из-за повышения температуры закалки на 20°C повышает магнитные свойства образцов колец, так значение $(BH)_{\max}$ повышается на 4 кДж/м^3 ; H_C – на 3 кА/м , а B_r – всего на 2 Тл .

При загрузке образцов колец в печь, предварительно нагретую до температуры закалки, наибольшие магнитные свойства имели образцы, обработанные по режиму №3. Если образцы нагревать совместно с печью до температуры 1080°C , то происходит полное превращение β фазы в β_1 и β_2 фазы, благодаря большей длительности пребывания образцов-колец в интервале температур указанного превращения образуются более равновесная структура β_1 фазы. Эти факторы обеспечивают получение максимальных магнитных свойств после термической обработки образцов-колец по режиму №4.

Таким образом, как и в случае нагрева образцов-колец из сплава ЮНДК35Т5БАА, загружаемых в предварительно нагретую печь до температур 1060 , 1080 и 1100°C , разность скоростей нагрева оказывает влияние на формирование магнитных свойств и на образцы-кольца из сплава ЮНДК35Т5, обработанных по неизменным режимам закалки. Это указывает на то, что при загрузке образцов-колец в предварительно нагретую печь до температуры закалки необходимо образцы-кольца закалывать с температуры 1100°C . Хотя магнитные свойства сплава ЮНДК35Т5 меньше, чем после обработанного по режиму №4, однако значительно сокращается длительность нагрева до температуры закалки по сравнению с нагревом образцов совместно с печью до температуры закалки.

Известно, что, после снятия внешнего магнитного поля магнитные свойства характеризуются кривыми размагничивания, которые для сплава

ЮНДК35Т5 построены по результатам проведенных исследований и представлены на рис. 2.

Анализ этих кривых показывает, что нагрев образцов совместно с печью позволяет получить максимальные магнитные свойства. В случае загрузки образцов-колец в печь, предварительно нагретую до температуры закалки, наибольшие магнитные свойства обеспечивает режим термической обработки №4.

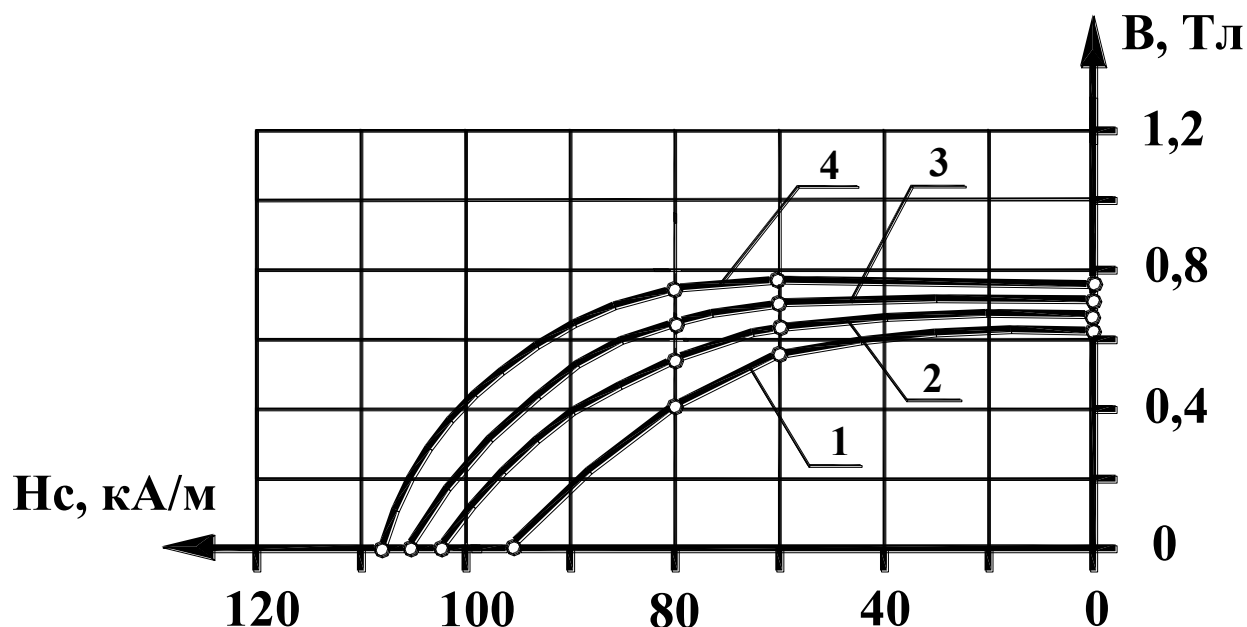


Рис. 2. Кривые размагничивания сплава ЮНДК35Т5: 1 – закалка по режиму № 1; 2 – закалка по режиму № 2; 3 – закалка по режиму № 3; 4 – закалка по режиму № 4

Выводы

1. Магнитные свойства образцов-колец исследуемых сплавов в первую очередь зависят от химического состава сплава, во вторую – от способа их нагрева. При нагреве образцов-колец совместно с печью до температуры закалки обеспечивается получение максимальных магнитных свойств.

2. В случае нагрева образцов-колец в печи, которая предварительно нагрета до температуры закалки, оптимальная температура закалки для выбранных сплавов 1100° С.

3. Нагрев образцов в печи, которая предварительно нагрета до температуры закалки, при незначительном снижении магнитных свойств позволяет значительно сократить время, затраченное на процесс термической обработки.